

О. І. КАСЛІН**ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПОСОБУ ПРИСКОРЕНОГО ВИМІРУ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК З ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВОЗІВ**

Проаналізовано проблему зростання тривалості і вартості регламентованої процедури екологічного діагностування дизельних силових установок, яка виникла з введенням нової нормованої величини – середньоексплуатаційного викиду твердих частинок з відпрацьованими газами дизелів. Запропоновано спосіб прискореного виміру масових викидів твердих частинок, який відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 8178. Впровадження цього способу дозволяє підвищити економічну ефективність екологічних випробувань дизелів. Розроблено методику оцінки ефективності використання запропонованого способу за критеріями: тривалості, витрат палива та вартості випробувань. На прикладі тепловозних дизелів експериментально обгрунтовано доцільність використання даного способу в ході екологічних випробувань дизельних силових установок великої потужності.

Ключові слова: дизель, відпрацьовані гази, тверді частинки, мікротунель, екологічність, спосіб прискореного виміру, випробувальний цикл.

А. И. КАСЛИН**ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПОСОБА УСКОРЕННОГО ЗАМЕРА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ ТЕПЛОВОЗОВ**

Проанализирована проблема увеличения продолжительности и стоимости регламентированной процедуры экологического диагностирования дизельных силовых установок, возникшая с введением новой нормированной величины – среднеексплуатационного выброса твердых частиц с отработавшими газами дизелей. Предложен способ ускоренного замера массовых выбросов твердых частиц, который соответствует требованиям международного стандарта ISO 8178. Внедрение этого способа позволяет повысить экономическую эффективность экологических испытаний дизелей. Разработана методика оценки эффективности использования предложенного способа по критериям: продолжительности, расхода топлива и стоимости испытаний. На примере тепловозных дизелей экспериментально обоснована целесообразность использования данного способа в ходе экологических испытаний дизельных силовых установок большой мощности.

Ключевые слова: дизель, отработавшие газы, твердые частицы, микротуннель, экологичность, способ ускоренного замера, испытательный цикл.

O. I. KASLIN**RATIONALE OF THE PURPOSE OF USING ACCELERATED MEASUREMENT METHOD OF PARTICULATE MATTERS WITH LOCOMOTIVE EXHAUST GASES**

Has been analyzed the problem of increasing the duration and cost of the regulated procedure for ecological diagnostics of diesel power plants during the measurement of particulate emissions compared with gaseous pollutants: nitrogen oxides, carbon monoxide and hydrocarbons, which appeared with the introduction of a new normalized value – the average operating emission of solid particles with exhaust gases of diesel engines. The accelerated measurement method of mass emissions of particulate matters, which meets the requirements of the international standard ISO 8178 is proposed. Implementation of this method allows to increase the economic efficiency of ecological testing of diesel engines by increasing the rate of filtration of the sample to the maximum allowable value and collecting the minimum permissible mass of particulate matters on the filters. The method of estimation of efficiency of using the proposed method according to the criteria of duration, fuel consumption and cost of tests is developed. The expediency of the use of this method in the course of ecological testing of locomotive diesel engines has been proved experimentally.

Keywords: diesel, exhaust gases, particulate matters, microtunnel, environmental friendliness, accelerated measurement method, test cycle.

Вступ. Процес екологізації транспортних ДВЗ характеризується поетапним введенням до складу нормованих показників токсичності дизелів величини середньоексплуатаційного викиду твердих частинок (ТЧ), який має позначення РМ (від англ. «particulate matter»). Так, з 1993 р. даний показник вимірюється в ході екологічних випробувань автомобільних дизелів, з 1997 р. – дизелів сільськогосподарських машин, а з 2007 р. – тепловозних та суднових дизелів. У перспективі показник РМ стане нормованою величиною для дизелів інших типів: побутових, промислових, двигунів спецтехніки та ін.

Постановка задачі. З початком нормування масових викидів ТЧ пов'язана проблема зростання тривалості і вартості екологічних випробувань дизелів через підвищені витрати часу на визначення показника РМ. Сутність даної проблеми полягає в наступному. Нормативною базою для проведення

екологічних випробувань дизелів є міжнародний стандарт ISO 8178 [1–3]. Цей документ передбачає визначення величини РМ разом з іншими показниками токсичності відпрацьованих газів (ВГ) дизеля – середньоексплуатаційними викидами газоподібних забруднюючих речовин: оксидів азоту, монооксиду вуглецю та вуглеводнів, які мають позначення GAS_x. Показники GAS_x і РМ визначаються в ході випробувальних циклів, які складаються з нормованих режимів роботи двигуна [3]. На кожному режимі проводиться відбір проб забруднюючих речовин для аналізу. Технологія контролю викидів ТЧ передбачає попереднє розбавлення ВГ двигуна атмосферним повітрям з подальшим пропусканням їх через фільтри для відбору проб ТЧ. При цьому тривалість відбору проби визначається швидкістю її фільтрації та масою навішування ТЧ, що збирається на фільтрах. В ході випробувань можлива реалізація одного з двох методів відбору проб ТЧ:

однофільтровою (ОФ), який передбачає використання одного фільтру за весь випробувальний цикл або багатофільтровою (БФ), який передбачає використання одного фільтру на кожному режимі випробувань.

Найбільш поширений сьогодні спосіб контролю викидів ТЧ, реалізований в мікро- та мінітуннелях фірм Perkins, AVL [4, 5], Mitsubishi [6], характеризується підвищеними витратами часу на відбір проб ТЧ, які істотно перевищують тривалості відбору проб газоподібних забруднюючих речовин – 5–7 хв на кожному режимі випробувань. Внаслідок цього процедура визначення показника РМ є більш тривалою за часом та дорожчою, ніж процедура контролю показників GAS_x : при ОФ методі – в 1,2...1,5 рази; при БФ методі – в 1,9...2,5 рази. Для вирішення цієї проблеми і підвищення економічної ефективності екологічних випробувань дизелів необхідно використовувати більш швидкісні способи вимірювань показника РМ.

Аналіз можливості підвищення швидкості вимірювання показника РМ. Стандартом ISO 8178 встановлено такі обмеження параметрів, які впливають на швидкість вимірювання масових викидів ТЧ: швидкість фільтрації проби розбавлених ВГ – v_f повинна знаходитись в діапазоні 35...100 см/с; маса навішування ТЧ, яка збирається на фільтрах, не має бути меншою за мінімально допустимі значення: при ОФ методі $M_{f(min)} = 0,25$ мг і МФ методі $M_{f(min)} = 0,14$ мг при використанні фільтрів з діаметрами 70 мм [1].

Найбільш поширені сьогодні способи контролю викидів ТЧ характеризуються швидкостями фільтрації проби – $v_f = 60...80$ см/с і масами навішувань ТЧ при ОФ і БФ методах відбору проб – $M_f = M_{fi} = 1,3$ мг (рис. 1).

Як видно з рис. 1, нормативними вимогами допускається реалізація способу прискореного виміру показника РМ (СПВ), який характеризується максимально допустимою швидкістю фільтрації проби – $v_{f(max)} = 100$ см/с і мінімально допустимими масами навішувань ТЧ – $M_{f(min)} = 0,25$ мг і $M_{fi(min)} = 0,14$ мг. Застосування даного способу дозволяє скоротити витрати часу на відбір проб ТЧ: при ОФ методі – в 3,1...4,1 рази; при БФ методі – в 5,3...7,1 рази і, внаслідок цього, зменшити вартість процедури екологічних випробувань дизеля.

Слід зазначити, що зниження маси навішування до мінімально допустимого значення призводить до деякого зниження точності вимірювань показника РМ. Однак, як показали дослідження, представлені в роботі [7, 8], результуюча похибка вимірювань показника РМ при реалізації СПВ не перевищує допустимого значення – $\pm 8,5\%$ [2], і, отже, даний спосіб може застосовуватись на практиці.

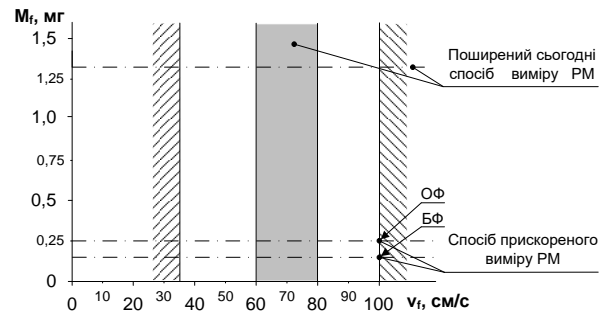


Рис. 1. Значення факторів, які визначають швидкість вимірювань показника РМ

Методика оцінки доцільності застосування способу прискореного виміру РМ передбачає порівняння 2-х способів вимірювання цього показника (див. рис. 1): найбільш швидкісного з поширених сьогодні – способу 1 та СПВ – способу 2. В якості критеріїв порівняння використовуються:

а) абсолютні величини: тривалості – τ^{test} , витрати палива на проведення випробувань – M_{fuel}^{test} та їх вартості – C^{test} ,

б) відносні величини: тривалість – $\overline{\tau^{test}}$, витрати палива на проведення – $\overline{M_{fuel}^{test}}$ і вартість – $\overline{C^{test}}$ випробувань.

Величини, τ^{test} , M_{fuel}^{test} та C^{test} розраховуються за допомогою наступних виразів:

$$\tau^{test} = \tau^{heat} + \sum_{i=1}^n \left(\tau_i^{st} + \max \left\{ \tau_i^{sam(GASx)}; \tau_i^{sam(PM)} \right\} \right), \quad (1)$$

де τ^{heat} – тривалість етапу попереднього прогріву дизеля, год;

n – число режимів випробувального циклу (для циклу ISO 8178-F $n = 3$);

τ_i^{st} – витрати часу на температурну стабілізацію дизеля, год;

$\tau_i^{sam(GASx)}$ і $\tau_i^{sam(PM)}$ – тривалості відбору проб газоподібних забруднюючих речовин і ТЧ, відповідно, год;

$$M_{fuel}^{test} = G_{fuel}^{heat} \tau^{heat} +$$

$$\sum_{i=1}^n \left(G_{fueli} \times \left(\tau_i^{st} + \max \left\{ \tau_i^{sam(GASx)}; \tau_i^{sam(PM)} \right\} \right) \right), \quad (2)$$

де G_{fuel}^{heat} – витрата палива на етапі попереднього прогріву дизеля, кг/год;

G_{fueli} – витрата палива на i -му режимі випробувань, кг/год;

$$C^{test} = M_{fuel}^{test} \times c_{fuel} + k_{oil} \times M_{fuel}^{test} \times c_{oil} + \tau^{test} \times c_{test}, \quad (3)$$

де c_{fuel} , c_{oil} – питомі величини вартості палива і мастила, відповідно, грн/кг;

c_{test} – вартість однієї години роботи персоналу, грн/год;

k_{oil} – коефіцієнт, що дорівнює відношенню маси мастила до маси палива, витрачених в ході випробувань.

Величини $\overline{\tau^{test}}$, $\overline{M_{fuel}^{test}}$ та $\overline{C^{test}}$ визначаються, як відношення величин τ^{test} , M_{fuel}^{test} та C^{test} , що

характеризують випробування, в яких вимірюється показник РМ, до відповідних величин, що характеризують випробування, в яких вимірюються показники GAS_x .

Результати оцінки доцільності застосування способу прискореного виміру показника РМ та їх аналіз. Дослідження доцільності застосування СПВ проводились на основі результатів екологічних випробувань тепловозних дизелів 1А–5Д49 і ПД1М за допомогою мікротунелю МКТ–2 [9, 10] при використанні компенсаційного методу відбору проби ВГ [11]. При проведенні досліджень враховувався вплив на ефективність СПВ фактору зниження рівня викидів ТЧ. Врахування даного фактору проводилось за допомогою відносної величини \overline{PM} , яка дорівнює відношенню існуючого сьогодні і фактичного рівнів викидів ТЧ.

Результати досліджень (за даними на 01.04.2018 р.) свідчать про економічну ефективність застосування СПВ в ході екологічних випробувань дизельних установок (особливо дизелів великої потужності) (рис. 2, 3).

Так, при випробуваннях тепловозних дизелів тривалість, витрати палива і вартість випробувань зменшуються: ОФ метод – на 9...28 %, що становить за одне випробування 0,2...0,7 год, 25...45 кг і 0,8...1,5 тис. грн; БФ метод – на 43...53 %, що становить за одне випробування 1,7...3,0 год, 120...225 кг і 4...7,5 тис. грн. Зі зменшенням рівнів викидів ТЧ ефективність СПВ зростає: зі збільшенням \overline{PM} на кожну 1 величини $\tau_{\text{test}}^{\text{test}}$, $M_{\text{fuel}}^{\text{test}}$ та C^{test} додатково зменшуються: ОФ метод – на 0,3...0,7 год, 45...55 кг і 1,5...1,8 тис. грн; БФ метод – на 1,7...3,0 год, 115...235 кг і 3,8...7,8 тис. грн.

Висновки. З початком нормування середньоексплуатаційного питомої викиду твердих частинок через відносно низьку швидкість вимірювання даного показника істотно зростають тривалість (однофільтровий метод – в 1,2...1,5 рази; багатофільтровий метод – в 2,0...3,0 рази) і вартість (однофільтровий метод – в 1,1...1,4 рази; багатофільтровий метод – в 1,8...2,1 рази) екологічних випробувань дизельних двигунів.

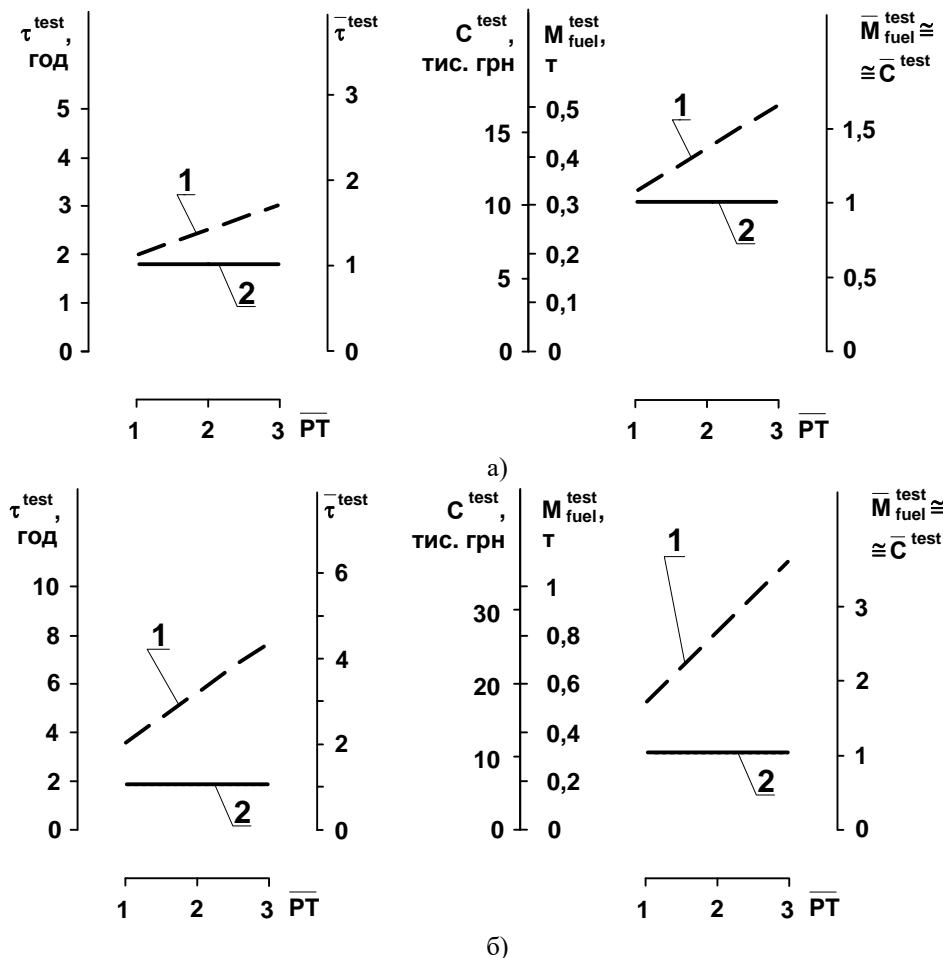


Рис. 2. Результати порівняльного аналізу ефективності способів 1 і 2 при випробуваннях магістрального тепловозу 1А–5Д49 з використанням ОФ (а) та БФ (б) методів відбору ТЧ

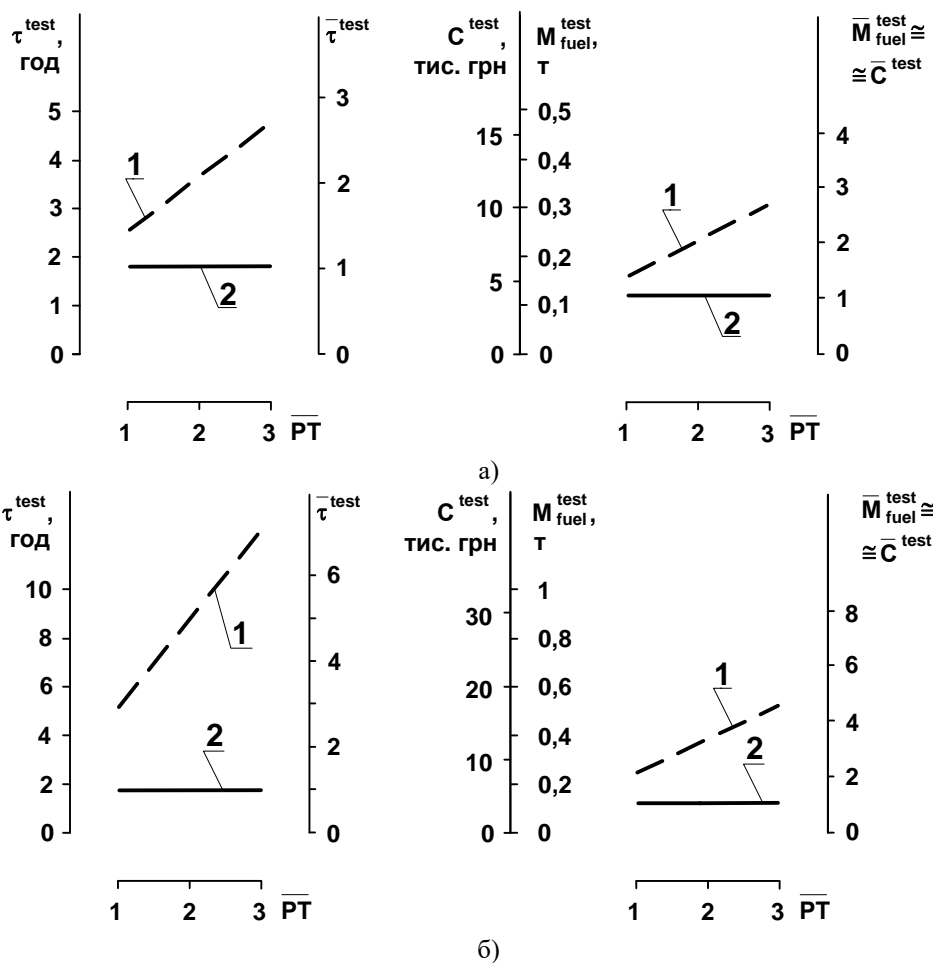


Рис. 3. Результати порівняльного аналізу ефективності способів 1 і 2 при випробуваннях магістрального тепловозу ПД1М з використанням ОФ (а) та БФ (б) методів відбору ТЧ

В рамках вимог стандарту ISO 8178 запропоновано спосіб прискореного виміру показника РМ, застосування якого дозволяє істотно зменшити тривалість відбору проб твердих частинок за рахунок підтримки максимальної швидкості фільтрації проби розбавлених відпрацьованих газів – 100 см/с і мінімально допустимих мас навішувань ТЧ при однофільтровому методі – 0,25 мг і при багатofільтровому методі – 0,14 мг: у 3,1...4,1 рази та у 5,3...7,1 рази відповідно.

У порівнянні із застосовуваними сьогодні способами контролю викидів твердих частинок спосіб прискореного виміру характеризується більш високою економічною ефективністю, особливо при випробуваннях дизелів великої потужності, яка в міру посилення норм на екологічні показники дизелів буде зростати.

Список літератури

1. ISO 8178-1: 2017. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test – bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 2017. 150 p.
2. ISO 8178-2: 2008. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 2: Test – Measurement of gaseous and particulate exhaust emissions at site, 2008. 19 p.
3. ISO 8178-4: 2017. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Test cycles for different engine applications, 2017. 237 p.
4. Smart Sampler PC SPC 472. PC program for SPC 472 control. AVL – List GmbH Graz, 1993. 76 p.
5. Lianga Z., Tiana J., Rezaeia S., Zhanga Y. Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC–ToF–MS / Birmingham: School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, 2015. 31 p.
6. Hirakouchi N., Fukano I., Shoji T. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel / SAE Technical Paper Series 890181, 1989. 11p.
7. Поливянчук А.П. Повышение точности гравиметрического метода измерений удельного выброса твердых частиц с отработавшими газами дизеля. Двигатели внутреннего сгорания. Харьков, НТУ «ХПИ», 2010. №2. С. 110–113.
8. Поливянчук А.П. Оценка неопределенности результатов измерений выбросов твердых частиц в ходе экологических испытаний дизелей. Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. Северодонецк, ВНУ им. В. Даля, 2012. №5 (176), Ч.2. С. 121–128.
9. Polivyanchuk A. The concept of creating universal systems for the environmental certification of transport diesels based on mini- and microtunnels. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія "Екологія". Харків, ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2017. №17. С. 72–79.
10. Поливянчук А.П., Каслін О.І., Смирний М.Ф., Строков О.П., Скурідіна О.О. Створення на базі мікротунелю універсальної системи динамічного контролю викидів дизельних твердих частинок. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. Харків, ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2017. № 3–4 (28). С. 141–153.
11. Поливянчук А.П., Каслін О.І., Смирний М.Ф., Строков О.П., Скурідіна О.О. Впровадження компенсаційного методу контролю проби в універсальних системах екологічного діагностування дизелів – мікротунелях. Вісник Харківського

національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія "Екологія". Харків, ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2017. №17. С. 80–88.

References (transliterated)

1. ISO 8178-1: 2017. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 1: Test – bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 2017. 150 p.
2. ISO 8178-2: 2008. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 2: Test – Measurement of gaseous and particulate exhaust emissions at site, 2008. 19 p.
3. ISO 8178-4: 2017. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part4: Test cycles for different engine applications, 2017. 237 p.
4. Smart Sampler PC SPC 472. PC program for SPC 472 control. AVL – List GmbH Graz, 1993. 76 p.
5. Lianga Z., Tiana J., Rezaeia S., Zhanga Y. Investigation of SVOC nanoparticle emission from light duty diesel engine using GC×GC–ToF–MS / Birmingham: School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, 2015. 31 p.
6. Hirakouchi N., Fukano I., Shoji T. Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini–Dilution Tunnel / SAE Technical Paper Series 890181, 1989. – 11p.
7. Polivyanchuk A. P. Povyshenie tochnosti gravimetricheskogo metoda izmerenij udelnogo vybroso tverdyh chastic s otrabotavshimi gazami dizelya [Improving the accuracy of the gravimetric method for measuring the specific emission of solid particles with exhaust gases of a diesel engine]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2010, no 2, pp. 110–113.
8. Polivyanchuk A. P. Ocenka neopredelennosti rezultatov izmerenij vybrosov tverdyh chastic v hode ekologicheskikh ispytaniy dizelej [Estimation of the uncertainty of the results of measurements of particulate emissions during the environmental tests of diesel engines]. *Vestnik Vostochnoukrainskogo natsionalnogo universiteta im. V. Dalya*. [Bulletin of the East Ukrainian National University memory V. Dal]. Severodonetsk, VNU named after V. Dal Publ., 2012, no 5 (176), issue 2, pp. 121–128.
9. Polivyanchuk A. The concept of creating universal systems for the environmental certification of transport diesels based on mini– and microtunnels. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya "Ekolohiia"* [Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin. Series "Ecology"]. Kharkiv, KhNU named after V. N. Karazin Publ., 2017. no 17, pp. 72–79.
10. Polivyanchuk A. P., Kaslin O. I., Smirny M. F., Stokov O. P., Skuridina O. O. Stvorennia na bazi mikrotuneliu universalnoi systemy dynamichnogo kontroliu vykydiv dyzelnykh tverdykh chastynek [Creation of the universal system of dynamic control of emissions of diesel solid particles on the basis if microtunnel]. *Liudyna ta dokillia. Problemy neoekolohii* [Man and environment. Issues of neoecology]. Kharkiv, KhNU named after V.N. Karazina Publ., 2017, no. 3–4(28), pp.141–153.
11. Polivyanchuk A. P., Kaslin O. I., Smirny M. F., Stokov O. P., Skuridina O. O. Vprovadzhennia kompensatsiinoho metodu kontroliu proby v universalnykh systemakh ekolohichnogo diahnostuvannia dyzeliv – mikrotuneliakh [Introduction of the compensatory method of gas sample control in universal systems of ecological diagnostics of diesel engines – microtunnels]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnogo universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya "Ekolohiia"* [Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin. Series "Ecology"]. Kharkiv, KhNU named after V. N. Karazin Publ., 2017, no. 17, pp. 80–88.

Надійшла (received) 31.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Каслін Олександр Ігорович (Каслин Александр Игоревич, Kaslin Oleksandr Ihorovych) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри Двигуни внутрішнього згоряння; м. Харків, Україна; e-mail: dvs@kpi.kharkov.ua